

DOI: 10.11779/CJGE2024S10026

海上风电大直径超长钢管桩竖向承载特性现场试验研究

韩冉冉, 乔小利*, 李明玉

(交通运输部天津水运工程科学研究院, 天津 300456)

摘要: 钢管桩是海上风电工程最主要的基础型式, 但针对海上大直径超长钢管桩竖向承载力问题的研究却相对较少。结合广东汕头海上风电工程, 进行了海上大直径超长钢管桩竖向承载力特性的现场试验研究, 对比了桩底沉降和桩顶沉降随上部荷载的变化特点, 分析了桩身侧摩阻力和桩端阻力随上部荷载的变化规律, 并依据试验结果对大直径超长钢管桩极限承载力判定方法进行了探讨。试验结果表明: 大直径超长钢管桩桩身变形较大, 利用桩底沉降随荷载的变化曲线更容易对现场加载量进行控制和调整, 也更容易对承载力的极限状态进行判断; 大直径超长钢管桩端阻力随桩顶荷载的变化曲线呈“S”形; 现行规范中采用 $Q/Q_{\max} \sim s/d$ 曲线斜率开始转变为 0.2 的点所对应的荷载作为极限承载力, 将过高的估计大直径超长钢管桩的竖向抗压极限承载力。

关键词: 超长钢管桩; 竖向承载特性; 侧摩阻力; 端阻力; 桩身变形

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0180-06

作者简介: 韩冉冉(1982—), 男, 山东淄博人, 硕士, 高级工程师, 主要从事软基处理及港口工程等方面的检测与研究工作。E-mail: nuanxn7758@sina.com。

Field tests on vertical bearing characteristics of large-diameter extra-long steel pipe piles in offshore wind power projects

HAN Ranran, QIAO Xiaoli, LI Mingyu

(Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: The steel pipe piles are the main foundation type for offshore wind power projects, but there are relatively few researches on the vertical bearing capacity of large-diameter ultra-long steel pipe piles in the sea. The field tests are conducted on the vertical bearing capacity characteristics of the large-diameter ultra-long steel pipe piles based on their application in an offshore wind power project in Shantou City of China. The variation rules of side shaft friction and tip resistance with pile load are analyzed, and the variation characteristics of tip settlement and top settlement of the pipe piles are compared. Additionally, based on the on-site test results, the method for determining the bearing capacity of the large-diameter ultra-long steel pipe piles is explored. The test results indicate that there is a significant pile deformation. It was easier to control and adjust the on-site loading amount by using the curve of tip settlement versus load, and it is also easier to judge the ultimate state of bearing capacity. The curve of tip resistance versus pile load shows an "S" shape. In the current code, the load corresponding to the point at which the slope of $Q/Q_{\max} \sim s/d$ curve begins to change to 0.2 is used as the ultimate bearing capacity to overestimate the vertical compressive ultimate bearing capacity of the large-diameter ultra-long steel pipe piles.

Key words: ultra-long steel pipe pile; vertical bearing characteristic; side shaft friction; tip resistance; pile deformation

0 引言

近年来, 随着中国新能源战略重点的转移, 海上风电建设进入了高速发展的时期。在海上风电建设过程中, 首先要解决的问题是如何在深海中建造一个稳固可靠的风电基础。由于国内海上风电建设起步较晚, 相关的设计方法有待完善, 水下工程地质资料可靠性不足, 以及海上复杂的风场流场等因素的制约, 急需通过一系列技术方法和手段对上述问题展开研究, 从而逐步完善海上风电基础的理论研究和设计方法。

在海上风电建设过程中, 国内技术人员多采用大直径钢管桩作为风电基础。通常情况下, 该类钢管桩直径达 $1.8 \sim 8.0$ m, 桩长大于 50 m, 属于大直径超长钢管桩^[1]。由于该类钢管桩多用于涉水的风电工程项目中, 加之现场自然条件较为苛刻, 实施现场试验的难度较大。以往的研究多集中在理论分析^[1-5]、室内试验^[4-5]和数值模拟^[2-3]3 个方面。理论分析方面: 彭文韬^[1]

收稿日期: 2024-04-29

*通信作者 (E-mail: qiaoxiaoli9615@126.com)

对超长大直径钢管桩竖向承载特性试验分析与预测。室内试验方面: 刘润等^[4-5]通过土工离心机试验研究了砂土和黏土中超大直径钢管桩内侧摩阻力发挥规律, 并与现行的 API 标准进行了对比。数值模拟方面: 张明远等^[3]对大直径超长钢管桩的竖向承载特性进行了模拟分析。但随着研究技术的进步, 近十年来, 越来越多的技术人员开始注重大直径超长钢管桩现场试验。徐彬等^[6]基于 API 标准对海上大直径钢管桩静压载试验进行了分析; 胡利文等^[7]利用自平衡法对海上风电钢管桩进行现场试验研究。在多数现场试验研究工作中, 受现场自然条件, 加载能力及设备安装等诸多客观因素的影响, 对于桩长大于 100 m、桩径大于 2.0 m、竖向极限承载力大于 50000 kN 的大直径超长钢管桩的现场试验研究甚少。

本文以广东汕头某海上风电工程为背景, 利用自主设计的 100000 kN 级鱼腹式组合钢梁, 对桩长 114 m, 桩径 2.4 m 的大直径超长钢管桩进行了竖向承载特性的现场试验研究。通过实测分级加载过程中的桩身应变、桩顶位移、桩底位移等参数的变化, 研究了桩身轴力、侧摩阻力、端阻力及桩身变形随上部荷载的变化规律。同时, 参照《水运工程桩基试验检测技术规范》^[8]对桩的竖向极限承载力的判定方法进行了探讨, 使其更适用于大直径超长钢管桩。

1 工程概况

汕头某海上风电工程, 采用 5 根大直径超长钢管桩组成的导管架基础型式, 由 1 根中心桩和 4 根角桩组成, 为了便于开展现场试验, 又增加了 2 根大直径超长钢管桩, 作为现场静载试验的基准桩, 各桩型类型、规格及主要参数详见表 1, 其平面布置图如图 1 所示。

根据区域地质资料, 场区地层由两大部分构成:

表 2 土层物理力学性质指标
Table 2 Physical and mechanical property indexes of soils

土层	地层 标号	层厚/ m	含水率/ %	重度/ (kN·m ⁻³)	孔隙比	压缩模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	桩侧极限摩 阻力标准值/ kPa	桩端极限端阻力 标准值/kPa
淤泥	② ₁	0.6	53.7	2.75	1.554	1.316	5.6	2.3	2	—
粉质黏土	③ ₁	9.5	34.6	2.72	0.947	4.348	38.7	4.6	47	—
粉质黏土	③ ₂	18.0	31.0	2.72	0.856	5.645	36.7	8.0	34	—
细砂	③ ₃	2.0	22.8	2.67	—	—	1.0	33.0	31	—
中砂	③ ₄	4.9	19.3	2.65	—	—	0.0	34.5	70	—
砾砂	④	10.5	—	—	—	—	—	—	108	7800
粉质黏土	⑤ ₂	13.4	28.5	2.72	0.783	7.687	46.7	13.9	68	2200
粗砾砂	⑤ ₃	1.5	—	—	—	—	—	—	95	8000
中砂	⑥ ₁	12.6	18.1	2.65	—	—	1.0	36.0	124	8550
细砂	⑥ ₂	12.3	20.6	2.66	—	—	2.0	34.5	92	4590

第四系全新统海相沉积地层 (Q_4^m) 和第四系全新统海相冲积层 (Q_4^{ml})。第四系全新统海相沉积地层基本为淤泥软土层; 第四系全更新统海相冲积地层呈黏性土层和砂土层交互分布状。整个工程区域地层结构自上而下分为 5 大层, 主要压缩土层物理力学性质指标见表 2。

表 1 各桩型类型、规格及主要参数

Table 1 Types, specifications and main parameters of various piles

桩名	桩型	桩径/mm	设计桩长/m	壁厚/mm	桩基类型	桩数
试桩(中心桩)	钢管桩	Φ2400	113.0	30~50	直桩	1
锚桩(角桩)	钢管桩	Φ2400	104.0	25	直桩	4
基准桩	钢管桩	Φ1500	80.0	20	直桩	2

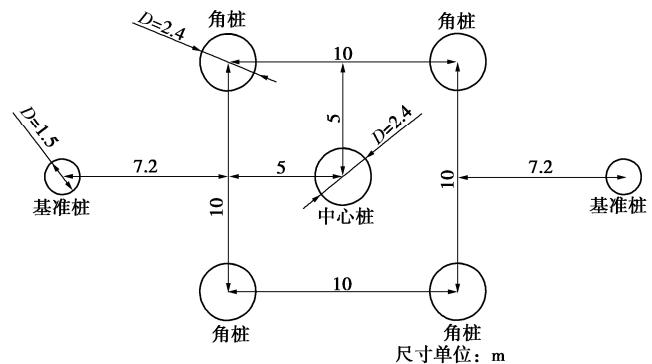


图 1 桩位布置示意图

Flag. 1 Sketch of pile position

2 现场加载试验方案

本次海上风电大直径超长钢管桩预估竖向抗压极限承载力为 50000 kN, 中心桩用作试桩, 角桩用作锚桩, 试桩与锚桩之间中心距 7.0 m, 锚桩之间的中心距 10.0 m, 基准桩与中心桩之间的中心距 12.2 m, 见图 1 所示。

2.1 反力及加载设备设计

考虑到海上恶劣的水文气象条件, 梁的加载能力

需达到100000 kN。为便于现场安装,对反力梁的截面尺寸进行了优化,4根同尺寸的鱼腹梁组成组合梁,梁长14.00 m,单根梁宽0.55 m,4根组合梁宽2.20 m,梁中部高3.00 m,梁边缘高2.35 m。

加载拟采用20个500 t千斤顶同步加载,为便于施加均匀荷载,同时方便现场安装,设计2块方形垫板,放于千斤顶底面和顶面。

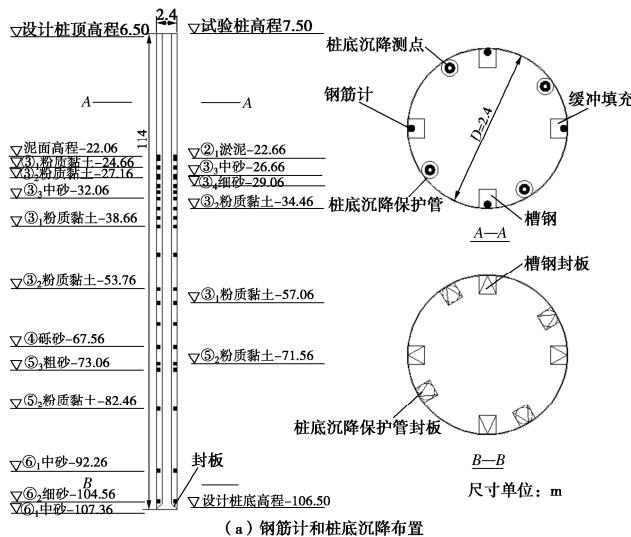
2.2 现场试验步骤

大直径超长钢管桩的现场试验,主要包括4个步骤:试验准备、现场测试仪器安装、反力系统和加载系统安装、现场测试。

(1) 试验准备阶段,按照预定的测试断面将钢筋计逐个焊接到钢管桩内侧,并用槽钢进行保护,见图2(a)。为了测量桩端沉降,顺桩长方向焊接4根直径约10 cm的钢管,并在桩端位置用斜封板密封,作为桩端沉降的测试孔。

(2) 现场测试仪器安装时,在桩底沉降保护管内安装DN32钢管作为桩端沉降测试的引出构件,并用细砂将内外钢管之间的缝隙填满;在桩顶以下钢筋计布设位置处开口,将钢筋计电缆按顺序引出试桩;为减小基准梁晃动,将2根基准梁焊接于两侧基准桩上;最后,安装位移表,连接千斤顶油路和各传感器线路,并检查确认安装连接是否正确和完好。

(3) 反力系统和加载系统安装时,下垫板顶面安放千斤顶,并将上垫板盖于千斤顶顶面,然后将活动封板封闭后整体吊装,利用下垫板底面限位装置,对中安放于试桩顶面,见图2(b);然后整体吊装4根反力主梁,利用限位导向构件并将其精确安装于千斤顶顶面,而反力主梁的两侧则支撑于锚桩之间的托架上;最后进行次梁、拉帽和精轧螺纹钢筋的安装,而拉帽可事先固定于次梁上进行整体吊装,最终安装效果图见2(c)。



(b) 加载设备安装
(c) 抗压试验安装效果图
图2 静载试验仪器布设及现场安装

Fig. 2 Layout and installation process of instruments

(4) 现场测试时,桩身应变测试和竖向承载力测试同步进行。为了保证测试的准确性,在距离桩顶大于1倍桩径处和泥面位置分别布置标定断面。考虑到海上加载的安全性,本次试验采用快速法进行。

3 测试结果分析

3.1 承载力分析

图3为本次试验大直径超长钢管桩 $Q-s$ 曲线和 $Q/Q_{\max}-s/d$ 。从3(a)图中可以看出, $Q-s$ (顶)曲线桩顶沉降达到40 mm时,上部荷载为36985 kN,仅为实际最大加载值的1/2,这说明超长桩不适宜用桩顶沉降作为极限承载力判别的原因。同时还发现 $Q-s$ (顶)曲线在最后一级荷载加载前,曲线呈微向下的缓变形趋势且没有明显破坏迹象,而在最后一级加载时,却出现沉降陡降和荷载加不上的问题,此时桩底发生“刺入破坏”。 $Q-s$ (底)曲线在桩顶荷载加至50000 kN前,曲线斜率几乎成水平线,而在桩顶荷载大于50000 kN后,曲线斜率逐渐增大,而当桩顶荷载达到71564 kN时,桩端沉降为27.19 mm,与上一级相比增大了17.26 mm。这说明桩基承载力已经接近极限,最终最大加载量加载至73886 kN时出现破坏。从 $Q-s$ (顶)曲线和 $Q-s$ (底)曲对比可知,对于大直径超长钢管桩现场试验, $Q-s$ (底)曲线比 $Q-s$ (顶)曲线斜率的变化更明显,从而更容易对承载力的极限状态进行判断,也更容易对现场加载量进行控制和调整。

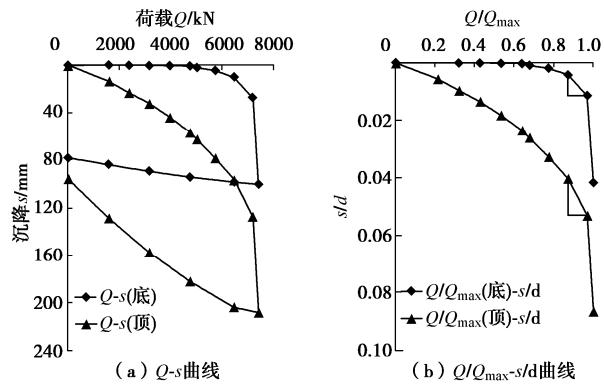


图3 试桩 $Q-s$ 和 $Q/Q_{\max}-s/d$ 曲线

Flag. 3 $Q-s$ curves and $Q/Q_{\max}-s/d$ curves of pile tests

由图 3 (b) 可知, $Q/Q_{\max} \cdot s(\text{顶})/d$ 曲线斜率整体上大于 $Q/Q_{\max} \cdot s(\text{底})/d$ 曲线的斜率, 但 $Q/Q_{\max} \cdot s(\text{底})/d$ 曲线斜率的变化率整体上大于 $Q/Q_{\max} \cdot s(\text{顶})/d$ 曲线。从图中还可看出, 加载至最后一级荷载前, $Q/Q_{\max} \cdot s(\text{顶})/d$ 曲线和 $Q/Q_{\max} \cdot s(\text{底})/d$ 曲线的斜率分别为 0.12 和 0.06, 均未达到 0.2。这说明若以 $Q/Q_{\max} \cdot s/d$ 曲线斜率开始转变为 0.2 的点对应的荷载作为极限承载力, 则将过高的估计大直径钢管桩的竖向抗压极限承载力。

3.2 桩身变形和沉降分析

图 4 为不同深度桩身变形随桩顶荷载变化曲线。从图 4 (a) 中可以看出, 桩身变形整体上可以分为 3 个区段: 第 1 区段为泥面以上的自由段, 桩身变形最为明显; 第 2 区段为泥面以下到桩身下部某深度, 桩身变形较为明显; 第 3 区段为桩身中下部某深度到桩端, 桩身变形很小。其中, 第 2 区段与第 3 区段的分界点与上部荷载大小有直接关系。当初级荷载施加时, 第 2、第 3 区段的分界点在深度 -63.0 m 处; 而在最后一级荷载施加时, 第 2、第 3 区段的分界点下移至深度 -87.0 m 附近, 说明泥面以下桩身显著变形的分界点随着桩顶荷载的增大有逐渐下移的趋势。由图 4(b) 可知: 在竖向抗压静载试验过程中实测的桩顶沉降与桩底沉降之差与通过桩身应变求得的桩身变形基本吻合。以桩顶 50000 kN 为界限, 桩顶荷载小于 50000 kN 时, 实测桩身变形比桩身应变计算的桩身变形略偏小, 而桩顶荷载大于 50000 kN 时反之。

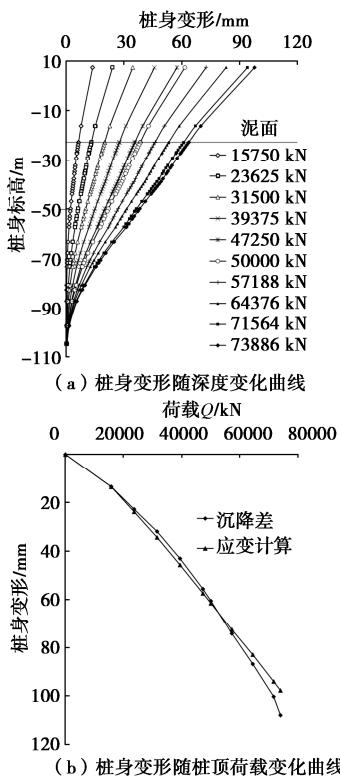


图 4 不同深度桩身变形随桩顶荷载变化曲线

Fig. 4 Curves of pile deformation versus load at different depths

3.3 桩身轴力和侧摩阻力分析

为了获得足够的数据, 在桩身中上部除土层分界面处布设外, 还根据具体情况每间隔 1.0~2.0 m 布设 1 组钢筋计。

(1) 桩身轴力分析

图 5 为不同深度桩身轴力随桩顶荷载变化的曲线。由图 5 (a) 可知, 大直径超长钢管桩桩身轴力自泥面开始向下逐渐减小, 说明土层中未出现负摩阻力, 桩身轴力因土层的摩阻力而逐渐减小。由图 5 (b) 可知, 接近泥面附近桩身轴力与桩顶荷载同步增长, 近似成正比关系, 而越接近桩身下部, 曲线越弯曲, 成“下凹”型。这说明在加载的初始阶段, 桩端轴力很小, 同时桩端阻力发挥有限。随着桩顶荷载的持续增大, 接近桩端处的轴力与桩顶荷载逐渐成直线关系同比例增长, 直至加载到桩端土体破坏, 桩端轴力约占桩顶实际加载的 10%。这说明大直径超长钢管桩, 桩身抗压承载力主要由侧摩阻力承担, 属于典型的摩擦桩。

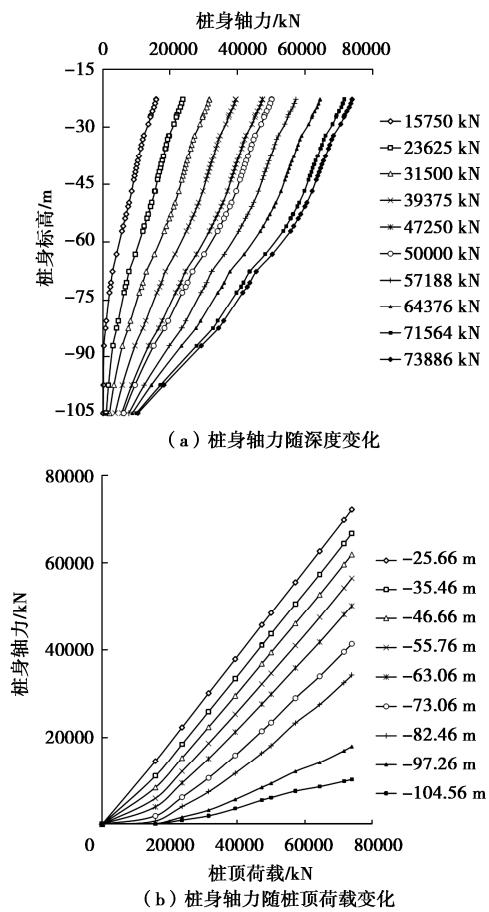


图 5 不同深度桩身轴力随桩顶荷载变化曲线

Fig. 5 Curves of axial force versus load at different depths

(2) 桩侧摩阻力分析

图 6 为不同深度桩侧摩阻力随桩顶荷载变化曲线。由图 6 (a) 可知, 桩侧摩阻力随土体深度呈多峰

分布状态。通常中粗砂侧摩阻力大于细砂，而细砂侧摩阻力大于粉质黏土，而桩身入土段中上部的侧摩阻力整体上小于桩身深部同类型土层的侧摩阻力。由图6(b)还可以看出，在施加初始荷载时，桩顶附近③₁中砂层侧摩阻力值接近该土层极限侧摩阻力70%，桩身中部④粗砂层侧摩阻力值约为该土层极限侧摩阻力的30%，而桩身下部⑥₁中砂层侧摩阻力仅为该土层极限侧摩阻力的1%。这说明随着荷载的增大桩侧摩阻力的发挥是一个自上而下的逐步发挥的过程。

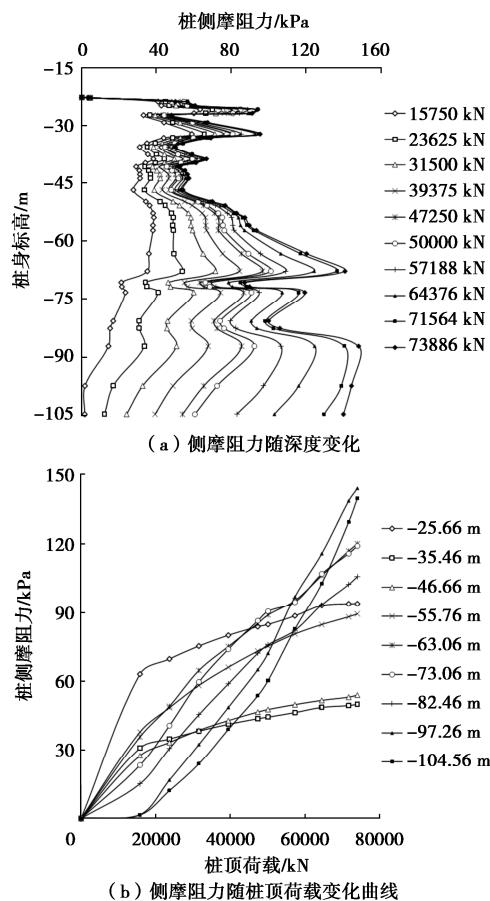


图6 不同深度桩侧摩阻力随桩顶荷载变化曲线

Fig. 6 Curves of side shaft friction versus load at different depths

此外，从表3可以看出：无论是砂土层还是粉质黏土层，通过静载试验求得的桩侧极限摩阻值整体上大于原位静力触探测试结果；其中最显著的为③₃细砂层桩侧极限摩阻值，静载试验测试结果比静力触探试验提高了117%。

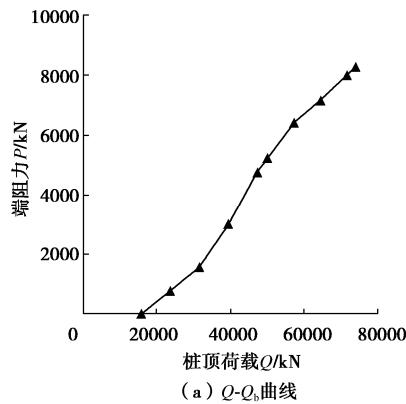
3.4 桩端阻力分析

图7为桩端阻力和端阻力与桩顶荷载之比随桩顶荷载变化曲线。由7(a)可以看出，大直径超长钢管桩端阻力随桩顶荷载变化曲线整体上呈“S”形。加载初期桩端阻力随桩顶荷载增大缓慢增大，曲线斜率较小，加载到第3级之后，曲线的斜率变陡，而加载到7级之后，曲线斜率再次变缓。这说明桩端阻力在加载开始阶段发挥较小，随着桩顶荷载的逐级施加，

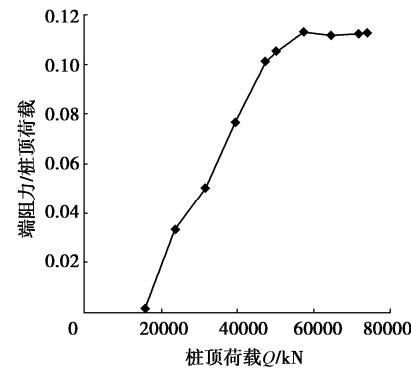
表3 桩侧极限摩阻测试结果对比
Table 3 Test results of limit friction resistance at pile side

土层	地层 标号	层厚 /m	桩侧极限摩阻标准值/kPa	
			静力触探测试	静载试验
淤泥	② ₁	0.6	2	3.7
粉质黏土	③ ₁	9.5	47	76.5
粉质黏土	③ ₂	18.0	34	50.1
细砂	③ ₃	2.0	31	67.3
中砂	③ ₄	4.9	70	94.7
砾砂	④	10.5	108	136.4
粉质黏土	⑤ ₂	13.4	68	86.4
粗砾砂	⑤ ₃	1.5	95	119.8
中砂	⑥ ₁	12.6	124	144.5
细砂	⑥ ₂	12.3	92	139.9

桩底沉降的增大，桩端阻力得到逐步的发挥，当加载到第7级时，桩端阻力随荷载增加的速率放缓，桩端阻力接近极限状态。从图7(b)可以看出，曲线整体上可以分为3段：施加桩顶荷载第1~5级时，曲线近似直线，且斜率较大；第5~7级加载时，曲线斜率逐渐变小；第7~10级加载时，曲线近似一条水平直线，说明桩端阻力和桩顶荷载同比例增大。



(a) $Q-Q_b$ 曲线



(b) $Q-Q_b/Q$ 曲线

图7 $Q-Q_b$ 和 $Q-Q_b/Q$ 曲线

Fig. 7 $Q-Q_b$ curve and $Q-Q_b/Q$ curve of pile tests

4 结论

本文依托海上风电工程，利用自主设计的100000 kN级鱼腹梁进行了海上大直径超长钢管桩的竖向承载性能的现场试验研究，得到以下4点结论。

(1) 海上大直径超长钢管桩, 应充分考虑加载过程中桩自身弹性变形对试验结果的影响, 仅利用桩顶沉降随桩顶荷载的变化曲线不便于分析桩身的承载特性, 也难以确定最终的承载力极限值, 应结合桩底沉降随桩顶荷载的变化曲线进行综合分析。对于直径大于 2.0 m 的超长钢管桩, 采用 $Q/Q_{\max} \cdot s/d$ 曲线斜率开始转变为 0.2 的点所对应的荷载作为极限承载力, 将过高的估计大直径超长钢管桩的竖向抗压极限承载力。

(2) 本次试验大直径超长钢管桩桩端轴力在桩顶荷载较大时, 约占桩顶荷载的 10%, 属于典型的摩擦桩。桩侧摩阻力随土体深度呈多峰分布状态, 这与桩身埋深范围内砂土层和粉质黏土层交替分布有关。

(3) 大直径超长钢管桩端阻力随桩顶荷载的变化曲线整体上呈“S”形, 表现为加载初期和加载后期桩端阻力随桩顶荷载的变化曲线的斜率小于加载中期桩端阻力随桩顶荷载的变化曲线的斜率。

(4) 本文主要探讨了海上风电大直径超长钢管桩竖向抗压承载力特性, 而海上风电导管架基础受力工况较为复杂, 实际工程中往往以桩基的抗拔特性作为主控条件, 为此该类桩的抗拔承载力特性尚需展开进一步研究。

参考文献:

- [1] 彭文韬. 超长大直径钢管桩竖向承载特性试验分析与预测方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010. (PENG Wentao. Study on Testing Analysis and Prediction Methods for Bearing Properties of Super-long and Large-diameter Steel Pipe Piles under Vertical Load[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010 (in Chinese))
- [2] 沈锦宁, 钱龙, 石锐龙, 等. 海上风电大直径钢管桩溜桩承载力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(增刊 1): 158-161. (SHEN Jinning QIAN Long SHI Ruilong, et al. Prediction for pile running of large-diameter steel pipes pile for offshore wind power[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(S1): 158-161. (in Chinese))
- [3] 张明远, 黎生南, 彭文韬, 等. 基于 FLAC3D 的超长大直径钢管桩竖向承载特性模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2856-2860. (ZHANG Mingyuan, LI Shengnan, PENG Wentao, et al. Simulation of vertical bearing features for large-diameter and super-long steel pipe pile based on FLAC3D[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2856-2860. (in Chinese))
- [4] 刘润, 韩德卿, 梁超, 等. 砂土中超大直径钢管桩内侧摩阻力研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1067-1075. (LIU Run, HAN Deqing, LIANG Chao, et al. Inner frictional resistance of super-large-diameter steel pipe piles in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1067-1075. (in Chinese))
- [5] 刘润, 尹瑞龙, 梁超, 等. 黏土中超大直径钢管桩内侧摩阻力研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 232-240, 250. (LIU Run, YIN Ruilong, LIANG Chao, et al. Inner frictional resistance of super-large diameter steel pipe pile in clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1): 232-240, 250. (in Chinese))
- [6] 徐彬, 易神州, 张昆, 等. 基于 API 规范的海上大直径钢管桩静压载试验分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(10): 134-140. (XU Bin, YI Shenzhou, ZHANG Kun, et al. Field test research on horizontal bearing performance of offshore large diameter steel pipe pile based on API criterion[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(10): 134-140. (in Chinese))
- [7] 胡利文, 娄学谦, 周密, 等. 海上风电钢管桩自平衡法现场试验研究[J]. 海洋工程, 2023, 41(1): 141-151. (HU Liwen, LOU Xueqian, ZHOU Mi, et al. Static load study on in-situ steel pipe pile for offshore wind farm using self-balancing method[J]. The Ocean Engineering, 2023, 41(1): 141-151. (in Chinese))
- [8] 水运工程桩基试验检测技术规范: JTS 240—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020. (Technical Code for Testing and Inspection of Waterway Engineering Foundation Piles: JTS 240—2020[S]. Beijing: China Communication Press, 2020. (in Chinese))

(编校: 孙振远)